

З. Я. ЛУРЬЕ, В. А. МАКЕЙ, Е. Н. ЦЕНТА

## СИНТЕЗ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ОПТИМИЗИРУЕМОГО ГИДРОАГРЕГАТА НАВЕСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТРАКТОРА ПО ДИНАМИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ

У статті обговорюється динамічний синтез гідроагрегата навісного обладнання трактора, пов'язаний з визначенням значень настроювальних коефіцієнтів каналів ПІД-регулятора, коефіцієнтів жорстких зворотних зв'язків за розміщенням і швидкістю штока гідроциліндра та за розміщенням золотника гідророзподільника, що забезпечують бажаний закон переміщення навісного обладнання. Як динамічні критерії розглядаються відносні інтегральні та взвешені оцінки, критерій Фішера.

In article it is discussed the dynamic synthesis of hydraulic unit of the tractor mounting equipment, related to the values determination of PID-REGULATOR passages adjustment factors of the unity feedback coefficients by the position and velocity of hydraulic cylinder rod and to by the position of transducer control valve, that are ensuring the desirable law of the mounting equipment displacement. Relative integral and weighed appreciations, Fisher's variance ratio are considered as dynamic criteria.

### Введение

В настоящее время на тракторах, оснащенных гидроагрегатом (ГА) управления навесным оборудованием (НО), выполняются различные операции обработки земли, такие как вспашка, боронование и др. Использование ГА НО, построенного по принципу «LS», т. е. чувствительного к нагрузке, позволяет улучшить пахоту на неровных поверхностях и на неоднородных почвах.

В состав этих ГА входят: электрогидравлические преобразователи (ЭГП), гидрораспределитель (ГР), исполнительные органы гидроцилиндры (ГЦ); измерительные преобразователи индуктивного типа перемещения навесного оборудования и усилия со стороны почвы; микропроцессорное устройство управления.

Важными характеристиками функционирования ГА НО, как и других ГА, являются показатели качества переходных процессов, определяемые структурой ГА, элементной базой, законом управления. Поэтому разработка математических моделей элементов этих ГА, исследование их динамики, решение оптимизационных задач и задач синтеза являются актуальными и представляют важные научные задачи.

Приведем одну из современных формулировок задачи синтеза регулятора [1]: дана модель объекта управления (вместе с измерительным преобразователем и исполнительным устройством); установлены цели управления; требуется выбрать регулятор и определить оптимальные значения каналов его настройки для обеспечения показателей качества динамики объекта. На рис. 1 показана схема этапов такого синтеза. Фактически процесс синтеза систем, в том числе и гидроагрегатов различного технологического оборудо-

вания, в настоящее время определяется в основном постановкой и решением оптимизационной задачи на ЭВМ с помощью одного из методов теории оптимальных систем.



Рис. 1. Схема этапов синтеза

### **Анализ последних исследований.**

Среди подобных ГА следует отметить ГА фирмы «Bosch» (ФРГ) [2], «Danfoss» (Дания), ИМИНМАШ НАНБ (Беларусь) [3] и проектируемый отечественный ГА.

Аналитический обзор этих работ [2, 3], показывает, что вопросам динамики ГА НО уделено недостаточное внимание, что снижает эффективность функционирования подобных систем в условиях эксплуатации. Кроме того в состав гидроагрегатов могут входить устройства (ПИ и ПИД-регуляторы, наблюдатели состояния и др.), параметры которых следует оптимизировать для улучшения переходных процессов.

В статье [4] рассматривается обобщенная система «колесный трактор – навесное оборудование» с выделением ее основных элементов: двигателя, приводящего в движение насос, гидрораспределителя, исполнительных гидроцилиндров. Математическая модель системы включает уравнения: движения трактора с учетом вращательного и поступательного перемещений; упругой подвески, редукторного механизма, подачи насоса, гидроцилиндра. Однако в работе недостаточное внимание уделено синтезу ГА НО и анализу его динамических характеристик.

Настоящая статья посвящена синтезу параметрически оптимизируемого отечественного ГА НО трактора, разработанного ОАО «ХТЗ», НИИГидроприводом и НПП «Хартрон-экспресс».

### **Постановка задачи.**



Входным воздействием на ГА является сигнал с пульта управления машиниста, а выходом перемещение штоков ГЦ (перемещение НО). ГА представляет собою динамическую систему, которая в процессе выполнения вспашки, боронования и других операций по обработке земли испытывает управляющие и возмущающие воздействия, приводящие к постоянным переходным процессам. Обеспечение желаемых показателей качества (быстродействия, статической точности, снижение колебательности, числа колебаний и др.) можно достичь при постановке и решении задачи синтеза по динамическому критерию относительно, например, выходной координаты ГА. Математическая модель ГА приведена в работе [5].

В качестве критериев оптимизации рассмотрим:  
относительную интегральную оценку

$$I_1 = \frac{\int_0^{t_K} |y_{ЖЕЛ}(t) - y_Z(t)| dt}{\int_0^{t_K} y_Z(t) dt} \cdot 100, \% , \quad (1)$$

где  $y_{ЖЕЛ}(t)$  – желаемая траектория перемещения штока ГЦ, например, при подъеме НО,  $y_Z(t)$  – кривая перемещения штока ГЦ, получаемая на математической модели [5] в процессе синтеза,  $t_K$  – время перемещения. Значение критерия  $I_1$  учитывает близость кривых в интегральном смысле за время переходного процесса  $t_K$ ;

критерий Фишера [6], который был предложен для проверки гипотезы равенства дисперсий двух совокупностей в дисперсионном анализе, регрессионном анализе, многомерном статистическом анализе. Критерий Фишера применительно к данной задаче синтеза можно представить следующим образом:

$$F = \frac{\sigma_2^2 S_1^2}{\sigma_1^2 S_2^2} , \quad (2)$$

$$\text{где } \sigma_1 = \bar{y}_Z = \frac{1}{t_K} \int_0^{t_K} y_Z(t) dt , \quad \sigma_2 = \bar{y}_{ЖЕЛ} = \frac{1}{t_K} \int_0^{t_K} y_{ЖЕЛ}(t) dt , \quad (3)$$

$$S_1^2 = \frac{1}{t_K} \int_0^{t_K} [y_Z(t) - \bar{y}_Z]^2 dt , \quad S_2^2 = \frac{1}{t_K} \int_0^{t_K} [y_{ЖЕЛ}(t) - \bar{y}_{ЖЕЛ}]^2 dt . \quad (4)$$

Если кривые  $y_Z(t)$  и  $y_{ЖЕЛ}(t)$  полностью совпадают, то  $F = 1$ . Учитывая, что методы оптимизации сводят решения к поиску минимального значения, запишем критерий оптимальности в виде

$$I_2 = (1 - F) \cdot 100, \% ; \quad (5)$$

интегральный взвешенный модуль ошибки управления (ИВМО) [1, 8]

$$I_3 = \int_0^{t_K} t \cdot |U_\varepsilon| dt, \quad (6)$$

основанный на вычислении интеграла от взвешенного модуля ошибки,  $U_\varepsilon$  – сигнал рассогласования;

относительную интегральную оценку, взвешенную по модулю отклонения площадей под сравниваемыми кривыми  $y_{ЖЕЛ}(t)$  и  $y_Z(t)$

$$I_4 = \frac{\int_0^{t_K} t \cdot |y_{ЖЕЛ}(t) - y_Z(t)| dt}{\int_0^{t_K} t \cdot y_Z(t) dt} \cdot 100, \% \quad (7)$$

которую назовем ОИВМОП.

В критерии  $I_4$  используется интегральный взвешенный модуль ошибки управления ИВМО, в котором вместо  $|U_\varepsilon|$  введен модуль  $|y_{ЖЕЛ}(t) - y_Z(t)|$ , что учитывает особенности поставленной задачи синтеза.

В качестве регулятора, широко применяемого в линейных системах, используем для исследуемого ГА НО (описываемого нелинейной моделью) ПИД-регулятор, параметры настройки которого подлежат оптимизации. Следует отметить, что известны примеры эффективного функционирования ПИД-регулятора в нелинейных системах [7].

При выборе  $y_{ЖЕЛ}(t)$  учитывается опыт машиностроения в части законов движения рабочих органов машины, характеризующихся плавностью при отработке заданного перемещения с ускорениями не превышающими  $0,5g$  ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения). Кривая  $y_{ЖЕЛ}(t)$  сама по себе при необходимости может быть определена в результате решения самостоятельной оптимизационной задачи.

Известно, что с определенной погрешностью математическую модель системы, описываемой дифференциальным уравнением высокого порядка, можно представить дифференциальным уравнением 3 – 4 порядка. В качестве такого приближения примем для желаемой кривой неоднородное дифференциальное уравнение третьего порядка вида

$$a_0 \frac{d^3 y_{ЖЕЛ}(t)}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 y_{ЖЕЛ}(t)}{dt^2} + a_2 \frac{dy_{ЖЕЛ}(t)}{dt} + y_{ЖЕЛ}(t) = y_Z(t_K), \quad (8)$$

с начальными условиями  $\frac{d^2 y_{ЖЕЛ}(0)}{dt^2} = \frac{dy_{ЖЕЛ}(0)}{dt} = y_{ЖЕЛ}(0) = 0$ , значением  $y_{ЖЕЛ}$

в конце процесса  $t_K$  равно  $y_Z(t_K)$  и коэффициентами  $a_0 - a_2$  при производных, принятых на основе исследования рассматриваемой модели ГА НО.

На рис. 3 изображена схема, где видны варьируемые параметры  $K_{0Z}$  (коэффициент обратной связи по положению штока ГЦ),  $K_{0V_Z}$  (коэффициент

обратной связи по скорости  $v_z$ ) и  $K_{0ГР}$  (коэффициент обратной связи по перемещению  $x_{ГР}$  золотника ГР), которые вместе со своими переменными  $y_z$ ,  $v_z$ ,  $x_{ГР}$  и входным сигналом  $U_{ВХ}$  после нелинейного преобразования (НП) образуют значение рассогласования  $U_\epsilon$  между заданием и обратными связями. Сигнал  $U_\epsilon$  подключен ко входу ПИД-регулятора, выход которого поступает на вход ЭГП.

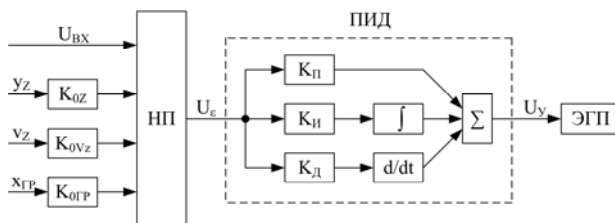


Рис. 3. Схема формирования управляющего воздействия гидроагрегата навесного оборудования

В качестве оптимизируемых параметров приняты: параметры  $K_\Pi$ ,  $K_\Pi$ ,  $K_\Delta$  каналов настройки ПИД-регулятора, т. е. пропорционального, интегрального и дифференциального; коэффициенты обратных связей  $K_{0Z}$  и  $K_{0ГР}$ . Кроме того, улучшение динамических характеристик систем с обратной связью по выходному параметру (в рассматриваемом случае  $y_z$ ) достигается введением обратной связи по скорости  $v_z$ . Таким образом, в процессе синтеза будет осуществляться поиск совокупности значений шести параметров, обеспечивающих близость оптимальной кривой  $y_z^0(t)$  к  $y_{ЖЕЛ}(t)$ , выбранной в качестве эталона.

**Решение.** Поставленная задача синтеза является однокритериальной со многими варьируемыми параметрами. Результат ее решения – закон перемещения НО на заданную высоту, близкий к желаемому. Все шесть варьируемых параметров влияют на заданное значение  $y_z(t_K)$  в конце переходного процесса. Если их число уменьшить, то точность приближения ГА к  $y_z(t_K)$  снижается. В табл. 1 показаны результаты оптимизации по критерию  $I_1$  при различных начальных значениях варьируемых параметров  $K_\Pi - K_{0ГР}$ . Учитывая, что синтезу подвергается ГА, описываемый нелинейной моделью, возникла необходимость выбрать несколько различных совокупностей начальных значений  $K_\Pi - K_{0ГР}$ . Как видно из табл. 1, каждой совокупности начальных значений соответствует различное сочетание оптимальных значений  $K_\Pi^0 - K_{0ГР}^0$  (буквой „0“ в верхнем индексе отмечается оптимальное значение параметра).

Таблица 1

Результаты оптимизации по критерию  $I_1$ 

№	Начальные значения						Оптимальные значения							$y_Z(t_K),$ см
	$K_{II}$	$K_{II}$	$K_D$	$K_{0Z},$ В/см	$K_{0V_z},$ Вс/см	$K_{0GP},$ В/см	$K_{II}^0$	$K_{II}^0$	$K_D^0$	$K_{0Z}^0,$ В/см	$K_{0V_z}^0,$ Вс/см	$K_{0GP}^0,$ В/см	$I, \%$	
1	1,0	0,03	$1 \cdot 10^{-5}$	0,134	0,017	4	0,989	0,03	$1 \cdot 10^{-5}$	0,134	0,017	4	2,163	25,25
2	1,0	0,08	$1 \cdot 10^{-4}$	0,14	0,03	3	0,707	$7,94 \cdot 10^{-2}$	$6,93 \cdot 10^{-4}$	0,142	$3,49 \cdot 10^{-2}$	2,8	2,076	25,31
3	1,5	0,15	$1 \cdot 10^{-3}$	0,16	0,04	2	1,263	0,148	$2,67 \cdot 10^{-4}$	0,159	$5,27 \cdot 10^{-2}$	1,87	1,43	25,3
4	–	–	–	0,185	–	0,4	–	–	–	–	–	–	3,1	25,07

Разные значения критерия оптимальности (от 2,163 до 1,43) можно объяснить нелинейностью модели. В качестве метода оптимизации выбран итеративный метод Powell, который имеется в пакете VisSim, и является разновидностью методов покоординатного спуска. Число итераций колеблется от 51 до 77.

В 4 строке табл. 1 приведены принятые значения  $K_{0Z} = 0,185$  В/см и  $K_{0GP} = 0,4$  В/см для модели ГА, в которой нет ПИД-регулятора и  $K_{0V_z} = 0$ . Значение критерия  $I_1$  в этом случае более чем в 2 раза хуже. Результаты синтеза и ввод в ГА ПИД-регулятора позволяют улучшить не только динамические характеристики, но и статические, что видно из данных табл. 2.

Таблица 2

Статические характеристики

$F_C, \text{кН}$	$y_Z(t_K), \text{см}$	
	без ПИД и $K_{0V_z} = 0$	После оптимизации по п. 3 табл. 1
0	25,38	25,28
50	25,3	25,28
100	25,22	25,3
150	25,14	25,3
180	25,07	25,3

Статическая ошибка для ГА без ПИД-регулятора и  $K_{0V_z} = 0$  при изменении нагрузки от 0 до 180 кН составляет 1,25 %, а для оптимального – ноль за счет интегрального канала ПИД-регулятора.

На рис. 4 показаны оптимальная кривая подъема НО (рис. 4а, кривая 1) и желаемая (рис. 4а, кривая 2), кривая изменения критерия  $I_1$  (рис. 4б), полученные по результатам оптимизации в соответствии с п. 3 табл. 1. Для большей общности кривые рис. 4а изображены в безразмерном виде, где за базо-

вую величину принято значение  $y_z(t_k)$ . Значение критерия оптимизации в процессе интегрирования уравнений ГА уменьшается и в конце становится равным 1,43 % (см. п. 3 табл. 1).

Математическая модель ГА НО характеризуется большим числом переменных: током  $I_1$  электромагнита, перемещениями  $x_{ЭП}$  плунжера ЭП и золотника  $x_{ГР1}$  ГР, давлением  $p_H$  на выходе насосного агрегата, давлениями  $p_1$  и  $p_2$  в полостях ГР и др. (всего 24 переменных). Поэтому представляет практическую значимость характер переходных процессов после синтеза ГА. На рис. 5 изображены осциллограммы переходных процессов 4 переменных, которые иллюстрируют режим подъема НО синтезированного ГА.

Поиск шести оптимальных параметров проводился применительно к максимальному значению подъема НО (в безразмерном исчислении равном 1). При меньшем значении подъема (0,36) оптимальная кривая 1, желаемая (кривая 2) и кривая 3 критерия  $I_1$  показаны на рис. 6. Отклонение кривых 1 и 2 в интервале времени 0 – 2 с существенно, значение критерия в конце процесса равно 12 %, что объясняется значительной нелинейностью модели ГА.

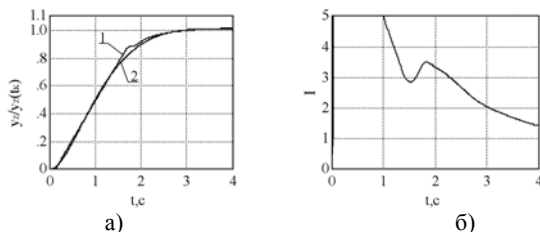


Рис. 4. Результаты синтеза по критерию  $I_1(t)$ : а – оптимальная (кривая 1), желаемая (кривая 2) траектории  $y_z/y_z(t_k)$  в безразмерном виде, б – кривая изменения критерия  $I_1(t)$

Проведенные исследования по решению поставленной задачи синтеза на базе четырех критериев показали, что наилучшая близость модельной и желаемой кривых достигается по критерию  $I_4$  (формула (7)). При этом получены следующие значения оптимальных параметров и критерия:  $K_H^0=1,028$ ,  $K_H^0=0,15$ ,  $K_D^0=2,68 \cdot 10^{-4}$ ,  $K_{0Z}^0=0,16$  В/см,  $K_{0ГР}^0=1,84$  В/см,  $K_{0v_z}^0=0,056$  В·с/см,  $I_4=0,82\%$ .

**Выводы.** 1. Задача синтеза гидроагрегата непосредственно связана с постановкой и решением оптимизационной задачи по назначенному динамическому критерию для обеспечения заданных свойств, включая и ввод дополнительного устройства (например, ПИД-регулятора). 2. Важным этапом синтеза является выбор или назначение траектории, отражающей желаемые динамические свойства гидроагрегата. 3. Выполненные исследования показали, что в качестве динамического критерия оптимальности предпочтение следует отдать относительной интегральной оценке (формула (7)), с помощью кото-



рой более точно вычисляется близость модельной и желаемой кривых.

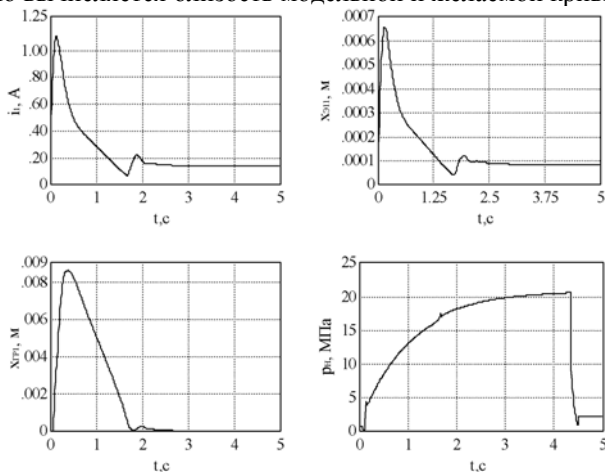


Рис. 5. Переходные процессы тока электромагнита  $I_1$ , перемещения плунжера  $x_{эл1}$  ЭГП и золотника ГР, давления  $p_H$  на выходе насосного агрегата при подъеме НО после синтеза

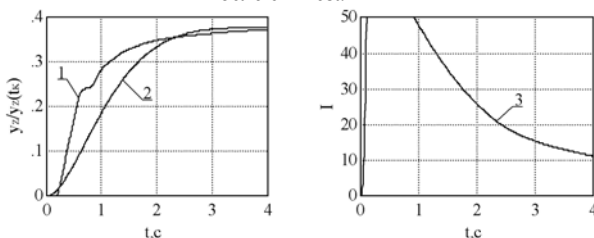


Рис. 6. Оценка решенной задачи синтеза для существенно меньшей величины подъема  $y_z$  НО (в безразмерном виде): кривая 1 – оптимальная; кривая 2 – желаемая; кривая 3 – критерий (1)

Список литературы: 1. Р. Дорф, Р. Бишоп. Современные системы управления / Перевод с английского Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний. – 2004. – 832 с. 2. Бондарь В. А. Новые решения в гидроприводе тракторов // Промислова гідравліка і пневматика. – 2003. – № 2. – С. 81 – 84. 3. Строк Е. Я., Бельчик Л. Д. Разработка перспективных конструкций систем управления навесным устройством трактора // Тр. XI Междуна. науч.-техн. конф. “Машиностроение и техносфера XXI века”. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – Т. 3. – С. 162 – 166. 4. Дмитриев В. М., Фалеева Е. Н., Перельмитер В. И. Автоматизированное моделирование динамики гидронавесных тракторных систем // Тракторы и сельхозмашины. – 1988. – №2. – С. 18 – 21. 5. Лурье З. Я., Макей В. А., Цента Е. Н. Математическое моделирование динамики гидроагрегата навесного оборудования трактора // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. №2/4 (32). – С. 36 – 41. 6. Математическая энциклопедия / Под ред. И. М. Виноградова. – М.: Советская энциклопедия. – 1984. – Т. 5. СЛУ – Я. – С. 1248. 7. Лурье З. Я., Дмитерко В. Н. Динамика системы управления гидротурбиной с ПИД- регулятором // Вестник СумДУ. Серия техники и науки. – 2003. – № 13 (59). – С. 144 – 150. 8. Проектирование гидравлических систем машин / Под общей ред. Г. М. Иванова. – М.: Машиностроение. – 1992. – 224 с.